

## 衛星データを使用した2011年の福島県における農地の土地被覆状況把握

著者	石塚 直樹
雑誌名	農業環境技術研究所報告
巻	34
ページ	81-100
発行年	2015-03
URL	<a href="http://doi.org/10.24514/00003014">http://doi.org/10.24514/00003014</a>

doi: 10.24514/00003014

農環研報 34,  
81-100 (2015)

## 衛星データを使用した2011年の福島県における 農地の土地被覆状況把握

### The understanding of land cover situation on the farmland in 2011 using satellite data at Fukushima

石塚直樹\*

(平成26年12月2日受理)

#### Synopsis :

In this study, I tried the understanding of the environment state of the farmland in Fukushima and neighbor prefectures in 2011 to contribute to an evaluation of the radioactive substance pollution of the farmland by the accident of Fukushima daiichi nuclear power plant which occurred with East Japan great earthquake disaster of March 11, 2011 with a satellite remote sensing technology. At first I was done interpretation of the paddy fields approximately one month after the accident by using an optical high resolution satellite image. I could interpret the state of rice straw, tilling and difference of water condition. Using large scale satellite image of 50cm high spatial resolution used. In addition, I estimated timings of the tilling and rice straw using ALOS images just after the accident and SPOT-5 image in the summer. Next, I carried out GIS analysis using DEM data. Paddy fields where fit condition, for example distance from forest and the slope, were distinguished. On the other hand, I detected the water logging paddy fields from satellite images in 2011 to use the fields for a soil pollution evaluation with the radioactive substances in NIAES. Water logging paddy fields distinguished and mapped approximately 3,200,000 over agricultural parcels at Fukushima, Ibaraki, Tochigi and Gunma prefecture. Overall accuracy of detection is 77.0% (n = 2,597), Producer's accuracy is 89.6%. It is consider that the accuracy reduced by influence of East Japan earthquake disaster, the accident at Fukushima daiichi nuclear power plant. Result and accuracy is good and enough for purpose. This result was used as one of the input data for the making of the radioactive substance pollution density distribution map in the farmland soil.

---

\* 生態系計測研究領域

## I まえがき

2011年3月11日の東日本大震災にともない発生した福島第一原発の事故により、放射性物質による汚染が福島県を中心に広範囲に発生した。国は2011年産の水稻の作付けについて、収穫される玄米が当時の食品の暫定規制値500 Bq/kgを超えないよう、土壌の放射性セシウム濃度5,000 Bq/kgを基準とした作付制限を実施した。さらに福島県は、収穫後のコメのサンプル調査結果にもとづき、2011年10月12日に安全宣言を行った。しかし、2011年11月16日、福島市の大波地区で収穫されたコメから、国の暫定規制値を上回る濃度の放射性セシウムが検出されたとの発表が行われ、その後、暫定規制値超の玄米が次々と発見された。そこで、本研究では暫定規制値超のコメが生産された圃場を中心に、2011年の福島県における農地の土地被覆状況の把握を、衛星リモートセンシングを使用して試みた。

放射性物質による土壌汚染を広域で評価する作業が(独)農業環境技術研究所で行われ、航空機観測による空間線量マップをもとに土壌汚染を推定する方法がとられた。その際、田と畑では土地被覆状態・農地環境が大きく異なるため、区分分けを行う必要がある。しかし、現在、日本の田の約1/3は転作・耕作放棄などにより水稻が作付けされていない。さらに、個々の農家が自分の圃場内でコムギ・ダイズ等の転作作物を作付けしている場合や、集落単位でブロックローテーションが行われる地域もあるため、水稻作付地の分布は毎年変化している。そこで、広域の農地土壌の放射性物質汚染評価(高田, 2011)に利用するため、福島県および隣接県における2011年度産の水稻作付が行われたと考えられる湛水圃場を衛星画像から検出し、分布状態の把握を行った。

## II 調査・研究方法

### 1 対象地域

対象地域は、圃場の土地被覆状態の把握については、暫定規制値を超えた放射性セシウム濃度の玄米が発見された福島市を中心とした地域である。放射性セシウム濃度が暫定規制値を超えた対象圃場は、農林水産省生産局より情報提供されたものである。ただし、収穫されたコメは農家によっては混合された状態であるため、生産圃場1筆と玄米中の放射性セシウム濃度との対応はついていない。

一方、広域の放射性物質による土壌汚染把握の資料と

するための湛水圃場把握は、福島県および隣接する宮城、栃木、茨城、群馬県のほぼ全域を対象とした。今回マップ化したのは湛水圃場であるため、厳密には2011年産の水稻作付圃場とは同じではない。しかし、田と畑における地表面状態の最大の違いは湛水であり、空間線量計測値に最も影響を与えられられる。さらに、田における水稻以外の湛水作物(ハス、マコモなど)や調整水田の面積は全体からすればわずかなものであるため、無視できるものと考えた。

### 2 使用したデータ

暫定規制値超えの圃場の環境把握に関しては、圃場1筆単位での評価が必要なこと、さらに中山間地域の狭小な水田が多いことから、空間分解能に優れた光学高分解能衛星画像を利用することとした。しかし、東日本大震災の発生以来、津波による沿岸被害および福島第一原発に注目が集まり、多くの衛星が太平洋沿岸域の観測を行ったため、今回対象とする内陸域の観測が非常に少なくなっていた。そのような状況の中、米国GeoEye社のGeoEye-1衛星が2011年4月10日に対象地域の観測を行っており、データを購入し利用した。(図1)。

また、空間分解能は不十分であるが、地震発生直後の状況を知るために、2011年3月12日に観測した日本のALOS衛星(Advanced Land Observing Satellite(陸域観測技術衛星「だいち」)のAVNIR-2(the Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2(高性能可視近赤外放射計2型))およびPRISM(the Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping(パンクロマチック立体視センサ))データを利用した(図2)。その後、ALOSが運用停止したため、夏季の状況を把握するための画像としてALOS同様の空間分解能を持つフランスの衛星SPOT-5の画像を利用した(図3)。利用した光学衛星の諸元を表1に示す。

一方、広域の湛水圃場の把握には、農林水産省の事業において水稻作付地判別で実績のある(農林水産省2010)、全天候型の合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar:SAR)を利用した。利用したSAR衛星の諸元を表2に示す。

衛星データの前処理および地形解析において、国土地理院の提供している数値標高モデル(Digital Elevation Model:DEM)である「10 mメッシュ(標高)」を利用した。また、衛星データと組み合わせて解析を行うため、DEM以外にも様々な地理情報システム(GIS)データを利用した。一覧を表3に示す。圃場耕区ポリゴンは、一

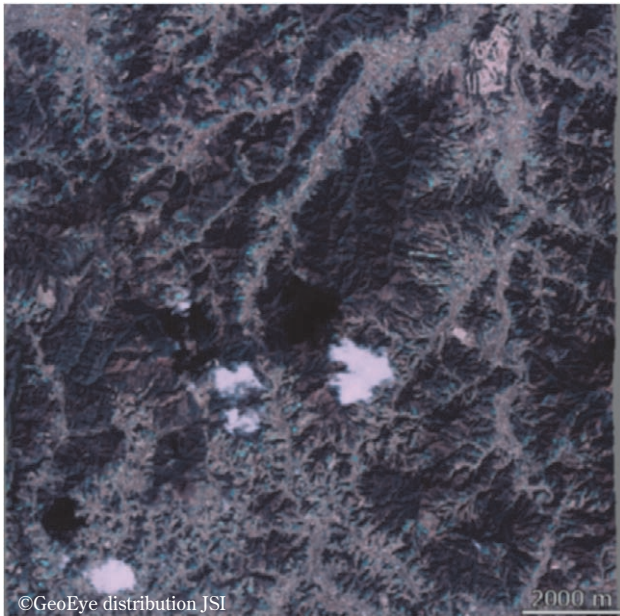


図1 GeoEye-1画像（パンシャープ済み）  
2011年4月10日観測（R：G：B=赤：緑：青）  
対象地の一部（福島市東部）。

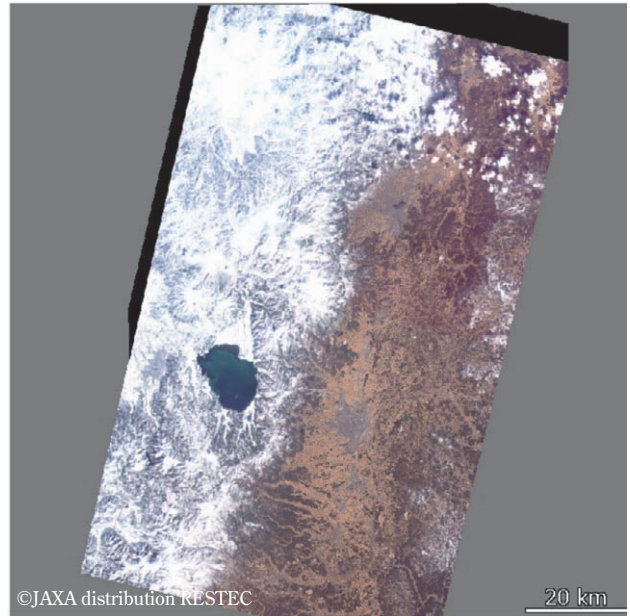


図2 ALOS/AVNIR-2+PRISMパンシャープ画像  
2011年3月12日観測（R：G：B=赤：緑：青）  
福島県中通り地域。画像中程にある暗い丸は猪苗代湖。

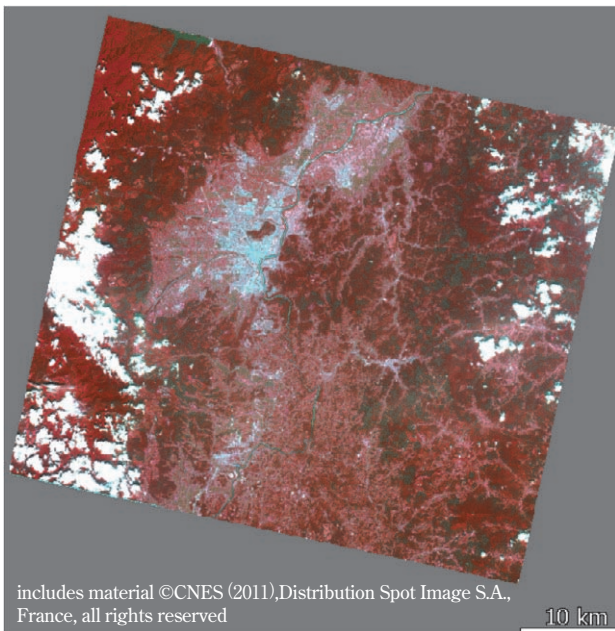


図3 SPOT-5画像（パンシャープ済み）  
2011年7月16日観測  
（R：G：B=近赤外：赤：緑）  
福島県中通り地域北部。中央の白っぽい所が福島市の市街地。

表1 使用した光学衛星データの諸元

衛星/センサ	バンド	空間分解能	撮影日
GeoEye-1	モノクロ	0.5 m	2011/4/10
	カラー(近赤外、赤、緑、青)	2 m	
ALOS/PRISM	モノクロ	2.5 m	2011/3/12
ALOS/AVNIR-2	カラー(近赤外、赤、緑、青)	10 m	
SPOT-5	モノクロ	2.5 m	2011/7/16
	カラー(中間赤外、近赤外、緑、青)	10 m	

表2 使用したSAR衛星データの諸元

衛星	バンド	空間分解能	観測日	対象地
RADARSAT-2	Cバンド	15.2～8.2 m×7.7 m (Wide Fine Mode)	2011年6月7日	宮城
			2011年6月9日	茨城・栃木
			2011年6月19日	福島
			2011年6月26日	群馬・栃木



表3 利用したGISデータの諸元

データ	データ提供元	備考
10m メッシュ (標高)	国土地理院	
道路縁	国土地理院	縮尺レベル25000
市町村境界	国土地理院	縮尺レベル25000
農業的土地利用	農業環境技術研究所	デジタル土壤図で公開のもの
土壤Cs濃度マップ	農業環境技術研究所	
圃場耕区ポリゴン	福島県土連	整備済み市町村のみ(1,753,658ポリゴン)
圃場耕区ポリゴン	茨城県土連	整備済み市町村のみ(1,210,460ポリゴン)
圃場耕区ポリゴン	栃木県土連	田のみ(478,380ポリゴン)
圃場耕区ポリゴン	群馬県土連	整備済み市町村のみ(741,655ポリゴン)
圃場耕区ポリゴン	千葉県土連	整備済み市町村のみ(749,999ポリゴン)

筆ごとのすべての農地圃場を地理座標付きのポリゴン(多角形)としてGISデータ化しているものであり、各県土地改良事業団体連合会(県土連)から貸与を受けた。また、SAR画像を用いた湛水圃場抽出には、農林水産省大臣官房統計部が2009年度～2010年度に行った「水稻作付面積調査における衛星画像活用事業」において開発した「水稻作付地判別・面積求積システム」の貸与を受け、利用した。

### 3 方法

#### (1) 全体の流れ

放射性物質による農地土壤汚染の評価に資する情報を広域にわたって把握することを目的として本研究を実施したが、コメの放射性物質汚染対策に対応した研究のため、一貫した研究方針で実施したのではなく、放射性物質汚染の実態把握の進展と共に研究内容が変化した。

暫定規制値超えの圃場の環境要因として、暫定規制値超の玄米が発見された当初には、この事象は谷津田のような水の集まるところで、かつ林地に接しているような圃場で発生すると想定した。そこで、谷津にある圃場(以下、谷津圃場と称する)および山からの水が流入する可能性のある圃場をDEMから抽出した後、土地利用データを重ねることでその中から水田を抽出した。さらに、衛星データから森林域を抽出し、森林域から一定の距離にある圃場を抽出することで、全ての条件の当てはまる圃場を抽出した。

その後、暫定規制値超えの玄米が次々と発見され、様々な調査が進行するにつれ、前述の条件のみで説明できないことが明らかとなった。またこの時点で提示された暫定規制値超え玄米が収穫された圃場情報と衛星画像を比較した際、一定数の圃場で収穫後に耕起されず稲藁がそのまま残されている圃場と高い関係性が確認されたことから、衛星データを用いて事故発生時の圃場の地表

面状態について画像判読を行った。

この判読作業を実施した後、暫定規制値超え玄米の発生についてさらに多くの要因からなることが判明し、稲藁と玄米濃度との関係のみから読み解くことは困難となった。そこで、衛星画像から判読可能なその他の要素について検討を行った。

一方、広域の湛水圃場の把握は、農林水産省大臣官房統計部によって開発された「水稻作付地判別・面積求積システム」を用いて湛水圃場を抽出した。

なお、一連の処理に以下のソフトウェアを使用した。汎用リモートセンシング画像処理として、TNTmips(Microimages社)とERDAS IMAGINE(ERDAS社)を、SAR画像データ処理として、The Next Generation SAR Toolbox(NEST(ヨーロッパ宇宙機関(ESA)))を使用し、またGIS関連についてはArcGIS(ESRI社)を使用した。

#### (2) 谷津圃場の抽出

国土地理院の1ピクセルサイズが10 mのDEMを用いて、簡易的な谷津圃場の抽出を試みた。具体的には、DEMデータの各ピクセルに対して8近傍ピクセルを参照することにより、傾斜度、傾斜方向などを求め、傾斜10度以下の地域を抽出した。続いて抽出した地域に3×3のウィンドウサイズでクランプと呼ばれるモロホロジカル処理を行い、DEMの3×3ピクセルの塊以下、つまり約45 m幅以下の谷地形を抽出した。また、傾斜度が10度以上から10度以下に変化する地形屈曲地点(点が列状に集合しているため、その多くは線状となっている)の抽出を行った。続いて圃場耕区ポリゴンデータを用い、前述の地形データより抽出された谷地形領域および地形屈曲地点を含む圃場を谷津圃場として抽出を行った。

### (3) 森林域の抽出と隣接水田の抽出

森林域の抽出には表1で示した衛星画像を用いた。まず前処理として、GeoEye-1画像はDEMデータとRPC (Rational Polynomial Coefficients) モデルデータを用いて幾何補正を行った。それ以外のALOSおよびSPOT-5データは圃場耕区ポリゴンに合わせ込む精密幾何補正を行った。続いてそれぞれの衛星データの4バンドづつをK-means法 (Hartigan, 1979) で20項目に教師無し分類を行い、画像判読をもとに森林域を抽出した。先に抽出した谷津圃場および地形屈曲地点の圃場に対して土地利用データを重ねて水田のみを対象とし、抽出した森林域より10 mのバッファを発生させ、谷津および地形屈曲地点の水田が森林域から10 m以内か以上かを判定した。

### (4) 稲藁などの地表面状態の判読

GeoEye-1衛星画像は50 cmという高い空間分解能を有し、航空写真に近いレベルで画像判読が可能である。そこで撮影時における稲藁などの農地地表面の状態の判読を行った。判読に用いるため、それぞれの衛星データにおいて解像度の高いモノクロ画像と解像度の低いカラー画像を組み合わせ、モノクロ画像の高い解像度に合わせ込むパンシャープン画像を作成した。パンシャープン処理の手法としてParisを用いた。その後、農林水産省生産局より提供された放射性セシウム調査圃場の周辺画像を作成し、情報提供した。

### (5) 玄米中の放射性セシウム濃度と衛星画像との関係解析

放射性セシウム濃度が暫定規制値を越えた玄米が収穫された圃場における衛星画像のピクセル値と、玄米中の放射性セシウム濃度との間に何らかの関係があるか、解析を行った。

### (6) 広域の湛水圃場の抽出

前処理としてRADARSAT-2データをNESTによりDEMを用いて地図座標と合わせるオルソ補正を行った後、ピクセル値を後方散乱係数 ( $\gamma^0$ ) に変換した。そのデータと圃場耕区ポリゴンデータを組み合わせ、「水稻作付地判別・面積求積システム」を用いて湛水か否かを判定した後、当時の避難区域 (避難指示区域、計画的避難区域等) にマスク処理を行うことで2011年度の湛水圃場分布図を作成した。対象領域における宮城県を除く4県の合計で320万筆以上の農地を対象に湛水判別を行った。なお、湛水圃場の抽出方法は、SARのマイクロ波が

水面で鏡面散乱することを利用しており、基礎的な部分は、石塚 (2006) で報告されている。また、貸与を受けたシステム開発には筆者も携わった。2011年度の湛水圃場分布図は、広域の放射性セシウムによる農地土壌汚染マップ作成に利用され、このマップは農林水産省より公表されている (農林水産省, 2012)。

## IV 結果および考察

### 1 谷津圃場の抽出

福島市付近の結果を例として示す。国土地理院の10 mDEMから傾斜度を計算し (図4)、傾斜10度未満の地域を抽出した (図5)。続いて約45 m幅以下の谷、および傾斜度が10度以上から10度未満に変化する地形屈曲地点の抽出結果を図6に示した。続いてこの結果に圃場耕区ポリゴンデータを重ね合わせ、前述の地形データより抽出された領域を含む圃場の抽出を行った (図7)。結果としては、平地部の圃場が抽出されることはなく、概ね良好な結果といえる。大局的には、ここで抽出された谷津圃場や地形屈曲地点の圃場は周辺の水が流入しやすい圃場といえる。ただし、DEMのピクセルサイズが10 mであるため、圃場レベルでの評価が十分にできているとまでは言えない。また、今回抽出した地形屈曲地点 (線状) は隣接する傾斜度の差までは考慮していないため、例えば傾斜10度付近の長い斜面なども抽出される可能性があり、急激な変化のある地点でない場合もあることにも注意が必要である。また、抽出した圃場と後背地との間に道路や河川がある場合、それらが分界界となつて水が流入する可能性は低くなるが、今回は道路や河川データを組み込んでいないため、評価されていない。

前述のように、今回解析に利用したDEMのピクセルサイズは10 mであり、発生している事象に対して十分な解像度を有しているとは言えない。対象地域の一部において、2012年3月28日に5 mのDEMが国土地理院より公開されたため、今後、このDEMを利用することにより精度向上が図れると考えられる。今回の条件で抽出された圃場数は、福島県全体で全圃場数の約1/3となる約55万筆となった。数値のみを見ると過大抽出かと思われるが、この結果には中山間地域の圃場は一筆が小さいため数が多くなることが影響している。

### 2 森林域と隣接水田の抽出

ここでは森林域の抽出が目的であるため、それ以外のカテゴリー分けを考慮せずに処理を行った。GeoEye-1画



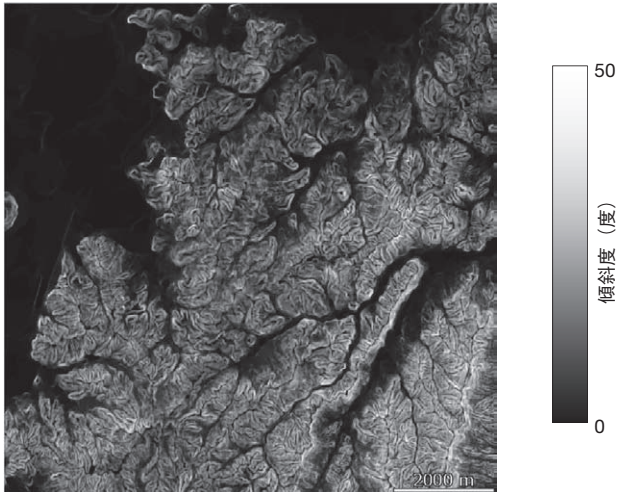


図4 DEMデータより計算された傾斜度  
(福島市東部)

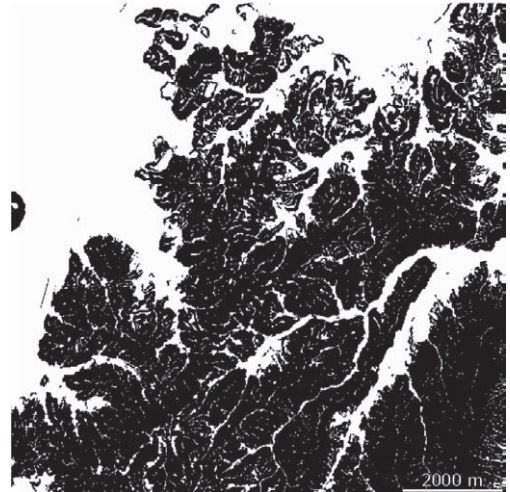


図5 傾斜度10度未満の地域  
(10度未満：白、10度以上：黒)

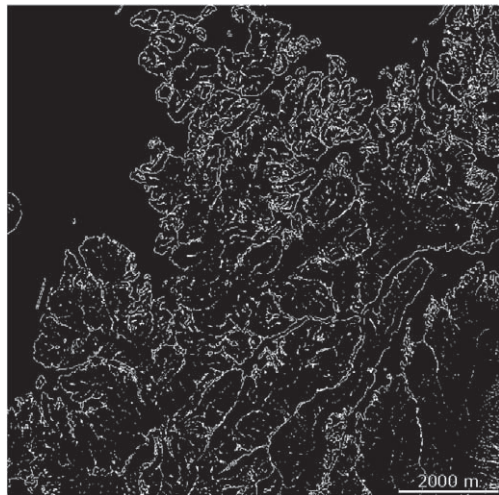


図6 抽出された幅約45 m以下の谷および  
傾斜10度の屈曲地点 (白)

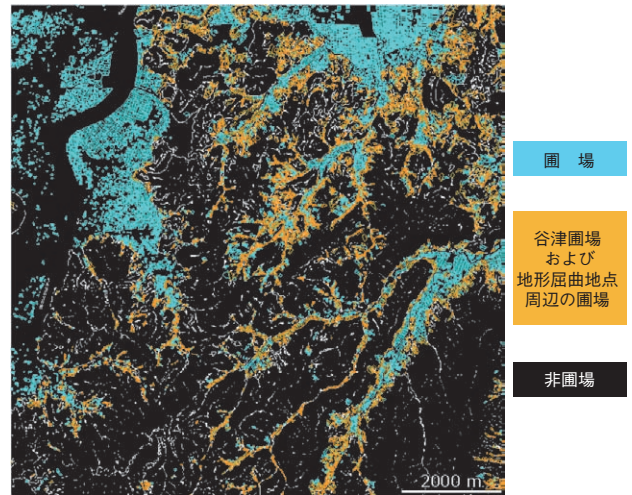


図7 抽出された谷津圃場および傾斜の地形屈曲地点周  
辺の圃場 (オレンジ色)

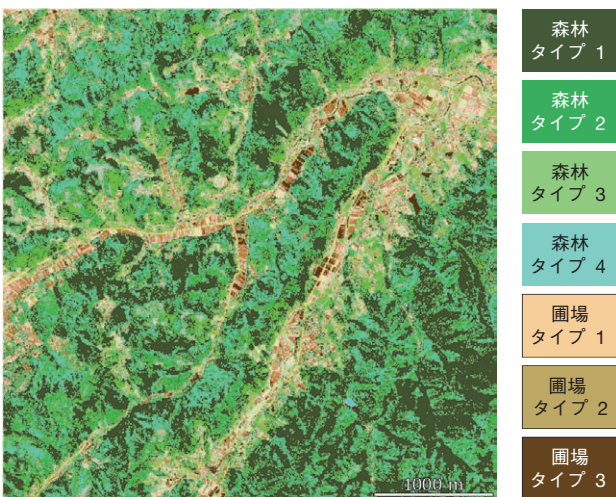


図8 GeoEye-1画像による森林域抽出のための分類結果  
(2011年4月10日観測)

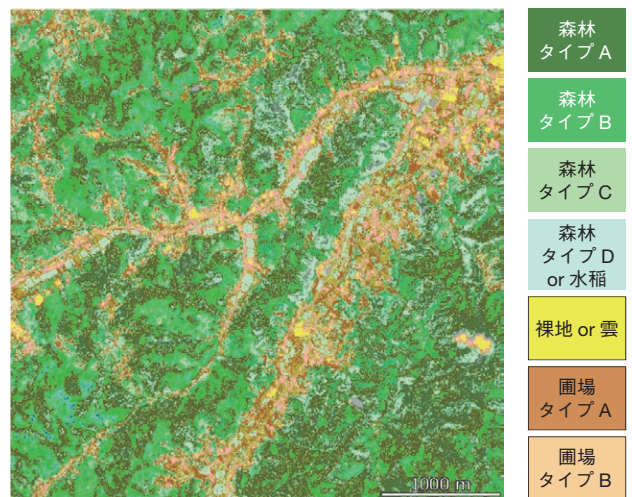


図9 SPOT-5画像による森林域抽出のための分類結果  
(2011年7月16日観測)



像の土地被覆分類結果を図8に示した。GeoEye-1画像はパンシャープン画像で50 cmと解像度が高いため、森林域のテクスチャを判読することが可能であり、専門家であれば森林の樹種判定がある程度可能である。今回、初期の計算結果において森林域を針葉樹、広葉樹などいくつかの κατηγοリーに分類することが可能であったため、森林を一つの κατηγοリーとはせず、分けたままにした。ただし、現地調査を行っていないため、カテゴリーが違ふことは衛星から判読できるが、個々のカテゴリーが何であるかは同定できなかった。図8において、緑系統の色となっている所は森林である。森林以外も3つのカテゴリーに区分して茶系統で示した。

一方、ALOSとSPOTの画像の場合、解像度がパンシャープン処理後で2.5 mのため、個々の樹木まで判読することは不可能である。しかし、SPOT-5画像の分類結果（図9）においても森林域が3～4カテゴリーに分類可能であると判断したため、統合せずにそのままとした。

ALOS画像の分類結果を図10に示す。ALOS画像の空間分解能はSPOT-5画像と同等であるため、SPOT-5画像の結果のように分類が可能と思われるが、森林域のカテゴリーを分けることができなかった。これは、①ALOS画像の撮影が3月とまだ植生が活性化する前であること、②ALOS特有のバンド間のズレ（JAXA, 2009）の影響、③画像の半分以上を雪が覆っている（図2）などが理由と考えられる。ただし、今回の森林域抽出という意味では十分な結果であり、さらに撮影時期から考えると、広葉樹は落葉しており針葉樹林を中心に抽出してい

ると推定される。

今後、広葉樹の落葉期と緑葉期の衛星の結果を組み合わせ、現地調査を行うことによって、森林域を針葉樹と広葉樹に分類することは可能である。福島第一原発事故により放射性セシウムが沈着した際、針葉樹は葉があったのに対し、冬期落葉広葉樹はまだ葉が無かったと考えられる。また、両者は秋のリター量も違うため、放射性セシウムの動態が異なっていると考えられる。このことから、今後、森林域の分類についても進める必要がある。

先に抽出した谷津圃場および地形屈曲地点の圃場に「農業的土地利用データ」を重ねて、水田のみを対象とし、今回求められた森林域より10 mのバッファを発生させ、対象水田が森林域から10 m以上離れているかどうかを判定した結果を図11に示した。図中の灰色部分は、非圃場であり、森林域などが含まれる。その結果を図4の傾斜角と合わせてみると、傾斜の大きい地域の谷津圃場のほとんどは森林域から10 m以内に存在している（図11では赤い圃場）ことがわかった。谷津田は、両側を森林域に挟まれた狭幅な谷間の水田であることから、ほとんどは森林域から10 m以内に存在していると判定されたが、解析により地域による差が現れている場所も抽出された。例えば、図11中の破線部分は、森林から10 m以内でない青色の圃場が多く分布しているのに対し、実線部分は森林から10 m以内赤色の圃場が占めており、地域性があるといえる。

今回、森林域から10 mという距離は衛星のマルチバンドの分解能などから決めた数値である。今後、リターによる影響が及ぶ距離や流入水の影響など放射性セシウ

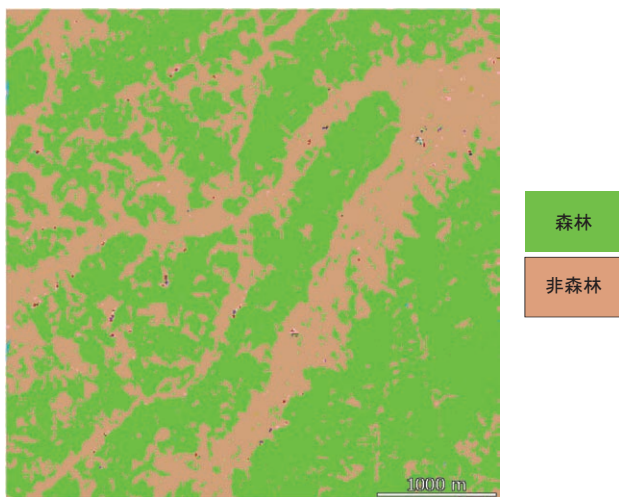


図10 ALOS画像による森林域抽出結果  
(2011年3月12日観測)

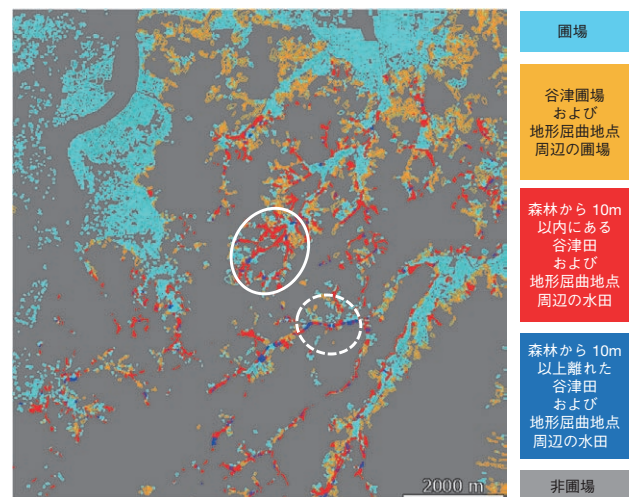


図11 谷津田および傾斜の地形屈曲地点周辺の水田の森林隣接判定結果



ムの動態について研究が進めば、それらの成果を基にした数値で評価を行うことが可能である。

### 3 稲藁などの地表面の状況把握

今回、農林水産省生産局より提供された放射性セシウム調査圃場について、対象圃場の地表面状況を知るため、周辺を含めて衛星画像を切り出し、資料として提供した。各衛星データを用いて、稲藁などの状態がどのようになっていたか等の地表面の状況について推察したので、いくつか代表的な例を説明する。

なお、全ての衛星画像でパンシャープ処理を行っている。GeoEye-1とALOSの画像については、R:G:Bにそれぞれ赤:緑:青のバンドを割り当て、人間が目で見える場合と同じ色合いになるカラー合成を行っている。一方、SPOT-5の画像については、衛星に青のバンドがないため、R:G:Bに近赤外:赤:緑のバンドをそれぞれ割り当てている。この組み合わせはフォールスカラーと呼ばれ、近赤外の反射が高い植生は赤く表示される特徴がある。なお、いずれのカラー合成においても水域は光を吸収するため黒く見える。

図12に示した圃場Aは、GeoEye-1画像において稲藁で明るいコンバインの刈り跡が筋上に確認できることと、稲藁残渣で圃場が乳白色に見えることから、4月10日時点で昨年の水稲収穫後何もしていない状態と判断できる。3月12日のALOS画像より、テクスチャは不明だが、圃場内が乳白色に明るく表示され、稲藁が地表面に残っていると判読できることから、3月12日も4月10日と同じ状況であり、この1ヶ月の間に目立った作業は行われていないと考えられる。7月16日のSPOT-5の画像を見ると、圃場内が暗くなっており湛水していることが確認できることから、2011年度産の水稲作付圃場と判読できる。

図13に示した圃場Bは、GeoEye-1の画像から、圃場Aとは異なり、全体的に暗く表示され、収穫後に耕起が行われていることがわかる。また、筋状のテクスチャも見られることから、プラウで粗く起こされていると考えられる。ALOS画像では空間分解能の限界から3月12日時点で耕起されていたかどうか判断が難しいが、暗い色になっていることから、圃場Aほど稲藁が残っていないと考えられる。SPOT-5画像において湛水していることから、2011年度産の水稲作付けは行われたと判読できる。

圃場C(図14)は、GeoEye-1画像から収穫後に耕起されている状態であることがわかる。また、筋状のテクス

チャが圃場Bより薄いことからディスク等で圃場Bよりは細かく耕起されていることがわかる。ALOS画像より、稲藁が地表面にある色に見えないことから、3月12日時点で耕起されていることがわかる。また、SPOT-5画像より2011年度産水稲作付けが行われたと判読できる。

圃場D(図15)は、GeoEye-1画像より、収穫後に耕起されていることがわかる一方、ロータリー式碎土機跡またはコンバイン跡と思われる幅広い帯状の筋が認められ、稲藁残渣が圃場内にかなりムラのある状態で確認できる。このことから、軽い耕起作業が行われたと考えられる。ALOS画像からはテクスチャも稲藁も明確に確認できないことから、細かい状況は不明であるが、周辺圃場との比較から類推すると、3月12日から4月10日までの間に何らかの農作業はなかったと思われる。SPOT-5の画像において、圃場が乳白色となっており地表面が湛水していないことから、2011年度は水稲の作付けが行われなかったと判読できる。

図16の圃場Eは、GeoEye-1画像が撮影された時に、北東部分に明るい部分があるが、その内側に暗い帯がみられ、さらに南西側は少し明るくなっている。人為的な作用でこのような模様が作られるとは考えにくく、おそらく圃場内にある傾斜によって、このような模様となっているものと考えられる。単に乾燥具合の差とも考えられるが、たとえば、雨などにより、稲藁が北東に吹き寄せられているなどという状況も考えられ、この画像のみから判断するのは困難である。ALOS画像では、解像度の関係もあるが、同様の模様は確認できないためこの1ヶ月に何らかの農作業が行われたかを判読することは困難である。SPOT-5の画像からは、2011年度産の水稲作付けが行われたと思われるものの、圃場の北と南で色が違うため、一部分のみ作付けされた(部分的に作付けがされなかった)可能性もある。

図17に示した圃場Fは、GeoEye-1画像から圃場中央付近になんらかのものが集められていることがわかる。色情的には稲藁と思われるが、このように見えるにはどのような状態で地表面に存在したかまでの判読は難しい。一方、それ以外の部分は暗くなっていることから、収穫後に一度耕起されたことがわかる。中央部を避けて耕起作業としたとは考えにくいことから、収穫後、一度耕起作業を行った後に圃場中央部に稲藁らしきものが置かれたと考えられる。また、ALOS画像においても、同様に中央付近に明るい部分がみられることから3月12日時点において4月10日撮影のGeoEye-1で確認された状況と同様の状態になっていたと考えられる。SPOT-5

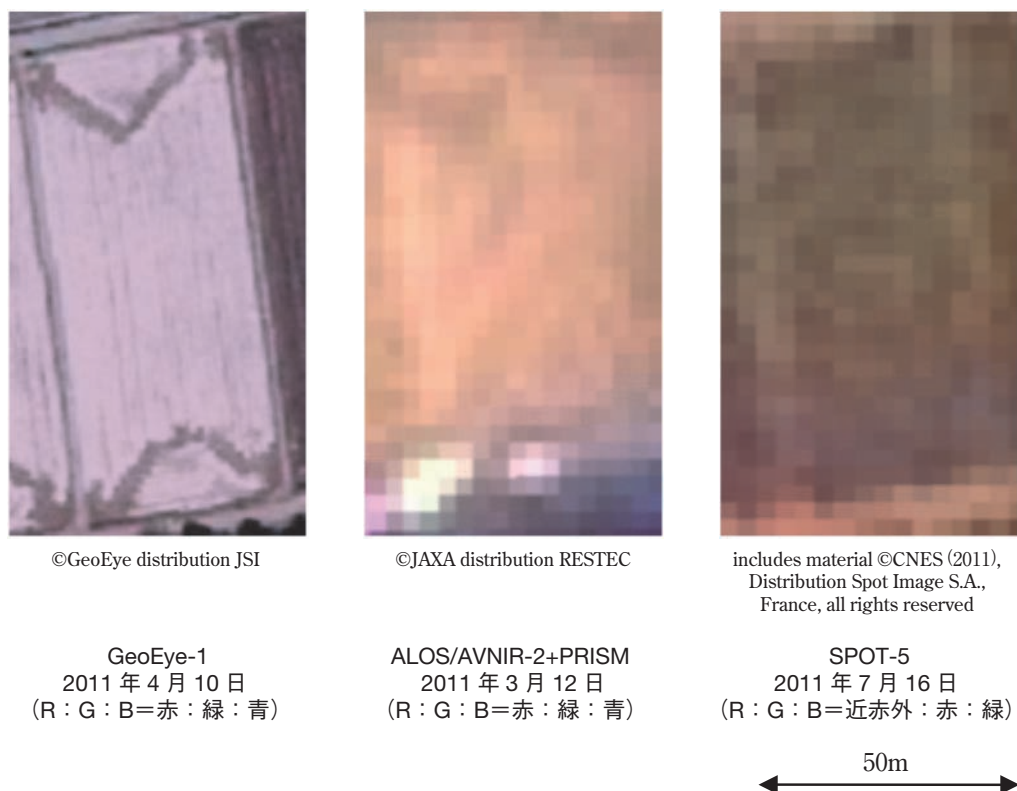


図12 圃場Aの衛星画像（パンシャープン済み）

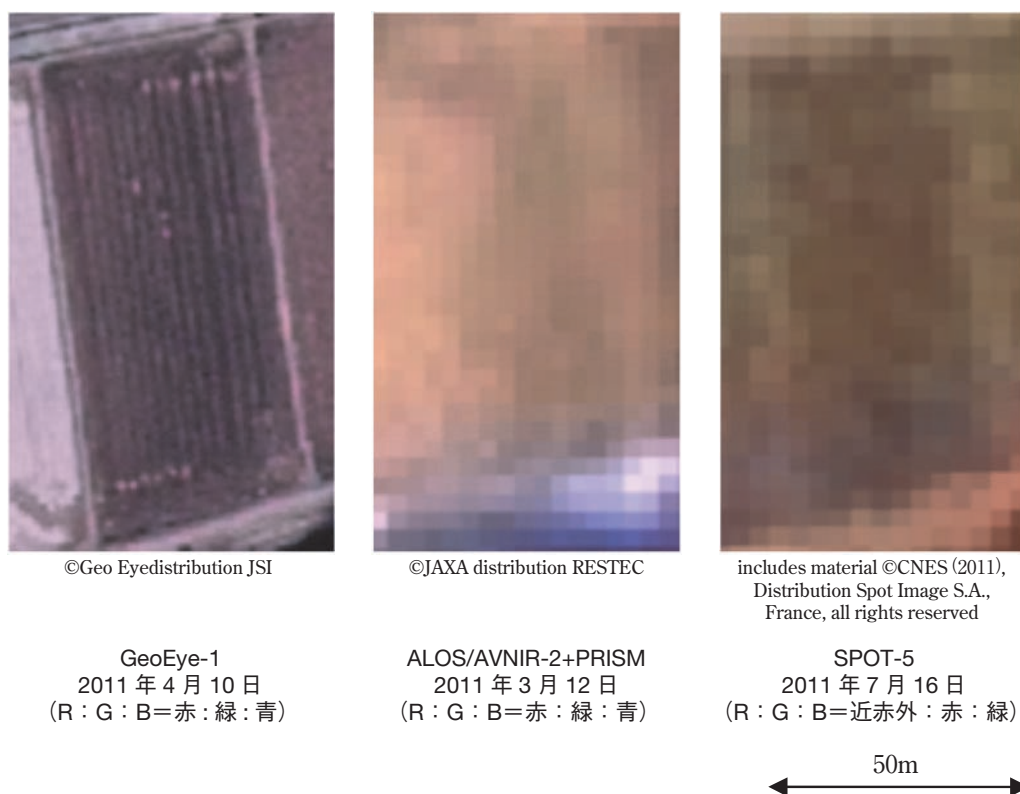
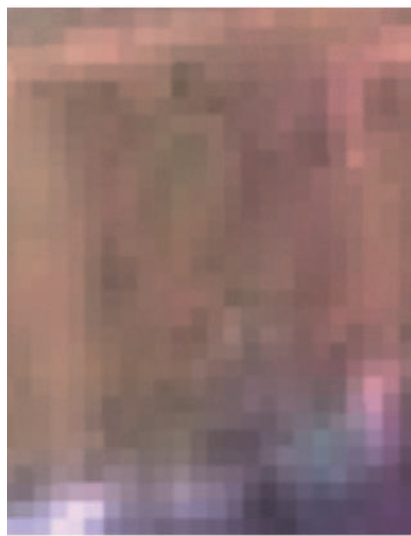


図13 圃場Bの衛星画像（パンシャープン済み）



©GeoEye distribution JSI

GeoEye-1  
2011年4月10日  
(R:G:B=赤:緑:青)



©JAXA distribution RESTEC

ALOS/AVNIR-2+PRISM  
2011年3月12日  
(R:G:B=赤:緑:青)



includes material ©CNES (2011),  
Distribution Spot Image S.A.,  
France, all rights reserved

SPOT-5  
2011年7月16日  
(R:G:B=近赤外:赤:緑)

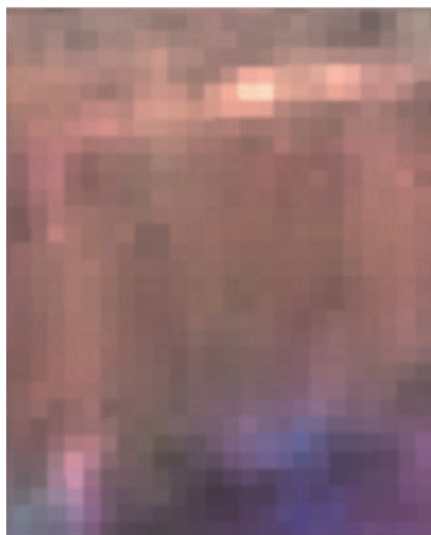
50m

図14 圃場Cの衛星画像 (パンシャープン済み)



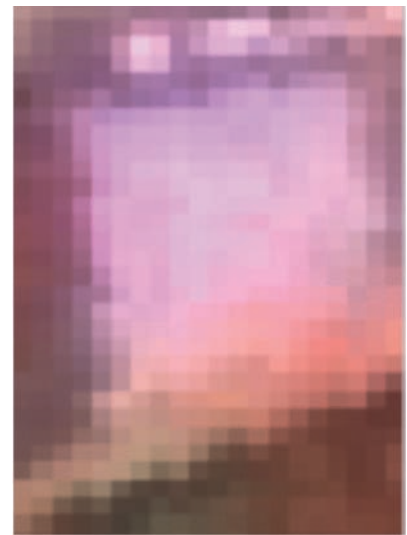
©GeoEye distribution JSI

GeoEye-1  
2011年4月10日  
(R:G:B=赤:緑:青)



©JAXA distribution RESTEC

ALOS/AVNIR-2+PRISM  
2011年3月12日  
(R:G:B=赤:緑:青)



includes material ©CNES (2011),  
Distribution Spot Image S.A.,  
France, all rights reserved

SPOT-5  
2011年7月16日  
(R:G:B=近赤外:赤:緑)

50m

図15 圃場Dの衛星画像 (パンシャープン済み)



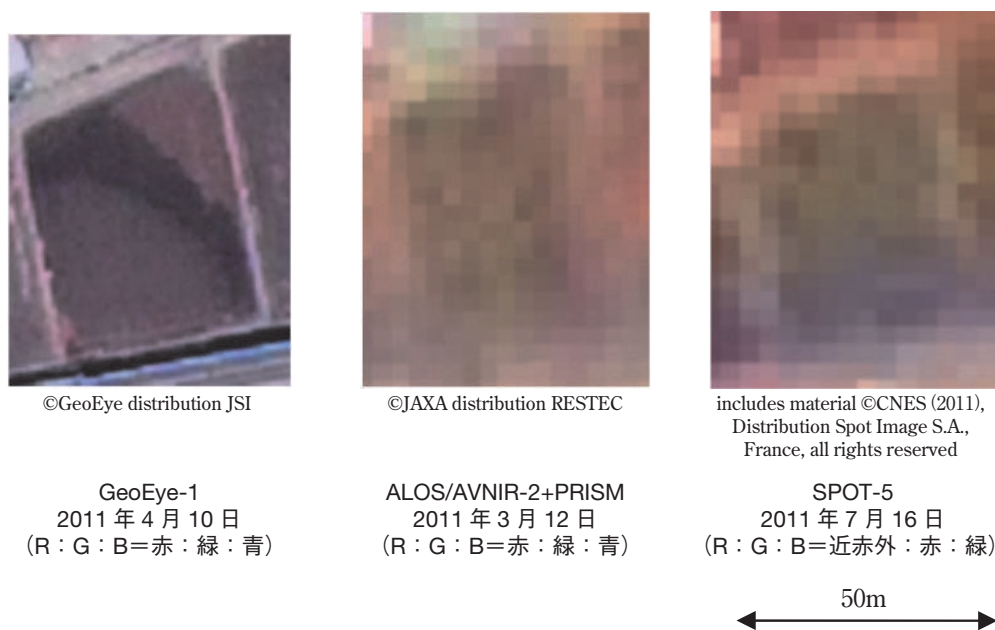


図16 圃場Eの衛星画像（パンシャープン済み）

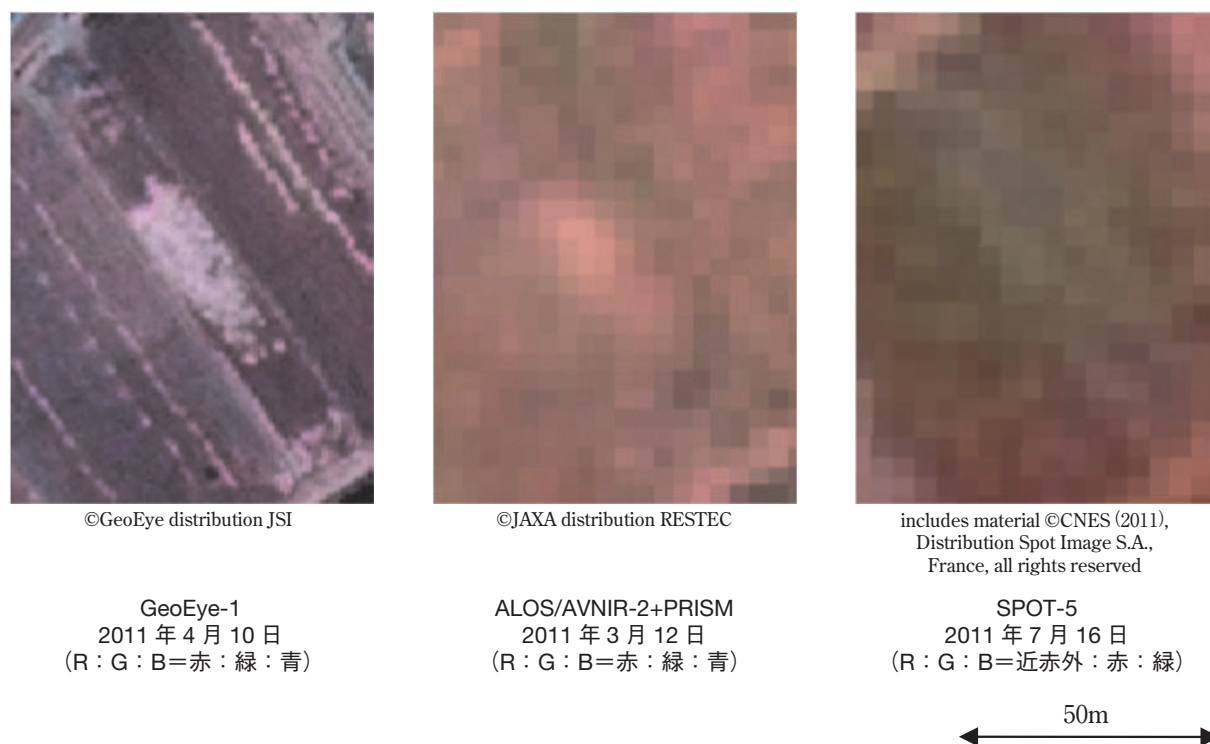


図17 圃場Fの衛星画像（パンシャープン済み）

の画像からは、2011年度産の水稲作付けが行われたと考えられる。

図18に示した圃場Gは、GeoEye-1画像の取得時には耕起されていることがわかる。圃場北西部分が暗めに見えるのは、その部分の稲藁残渣が少ないか、水分が多いと考えられる。また、集めた稲藁を燃やして黒くなっていること等も否定できない。3月12日のALOS画像では圃場全体に稲藁が残されているように見える。ALOSの分解能では刈跡などを確認できないため、収穫後そのままの状態であるのか、耕起しているが稲藁が全面に多く残されている状態であるのが、判読不能である。SPOT-5の画像において湛水状態の特徴を示していないことから、この圃場では2011年産の水稲は生産されていないことがわかる。

圃場H(図19)は、GeoEye-1画像より耕起作業が行われていることがわかる。筋状のテクスチャが確認できることからプラウ等で粗めに耕起されていると思われる。また、圃場左端部分に稲藁と思われるものが確認できる。ALOS画像においても圃場Hは周囲の圃場より暗く見え、且つ、圃場左端部分の稲藁も確認できることから、3月12日時点で耕起作業は完了しており、4月10日までの間に何の作業も行われなかったと思われる。SPOT-5画像より、2011年度産の水稲作付けが行われたと考えられる。

圃場I(図19)は、GeoEye-1画像より耕起作業が行われたと判読できる。圃場の長手方向北側に沿って筋状に稲藁の集合が認められる。これは、稲藁の畜産利用のために人為的に集められていると考えられる。圃場G同様に、3月12日のALOS画像では圃場全体に稲藁が残されているように見える。ALOSの分解能では刈跡などを確認できないため、収穫後そのままの状態であるのか、耕起した後に、全面に稲藁残渣が多く残されている状態なのかは不明である。しかしながら耕起後全面に稲藁が残っている可能性は低く、3月12日の時点では収穫後そのままであった可能性が高い。

圃場G,H,Iを比較すると、圃場HではGeoEye-1の画像とALOS画像で色の変化があまりないのに対し、圃場Gおよび圃場IではGeoEye-1の画像とALOSの画像で大きく変化していることから、3月12日から4月10日の間に何らかの作業が行われたと考えられる。さらに、圃場Iについては、その作業後に畜産利用のため稲藁が並べられた可能性が高い。SPOT-5画像より、2011年度産の水稲作付けが行われたと考えられる。

図20に示した圃場J、Kは、GeoEye-1画像において火

入れが行われた跡と判読できる。これは、圃場が暗く見えることと、それぞれの圃場の南西部分に、乳白色の稲藁が残っていることから、湛水によるものでなく、刈り株を焼いたものおよび焼け残りと判断できるためである。3月12日のALOS画像では火が入れられた様子がないことから、3月12日から4月10日の間に行われたと考えられる。またこのことは、収穫後から3月12日までに耕起が行われていないということも示唆している。圃場J、Kともに、SPOT-5画像から2011年度産の水稲作付けが行われたと考えられる。

続いて、図11において赤で示された、地形屈曲点周辺や森林から10 m以内にある狭い谷の谷津圃場がほとんどとなるような中山間地域の例として、図21を示した。中山間地域になると、ALOS画像やSPOT-5画像の解像度では判読が困難となる。圃場群Aは、GeoEye-1の画像より、4月10日時点で、南端の一部の圃場を除き、耕起されていることがわかる。ALOS画像においても暗く見えることから稲藁はほとんどなく、SPOT-5画像より、2011年度産の作付けも行われたと考えられる。圃場群Bもほぼ圃場群Aと同じ状態であると思われる。

圃場群Cは、GeoEye-1画像のテクスチャや、ALOS、SPOT-5画像での変化を加味すると、耕作放棄地と考えられる。耕作圃場に隣接する不撓乱の耕作放棄地も、森林域同様に放射性セシウムの負荷源となる可能性があることから、福島第一原発事故の時点で耕作放棄されていたか否かといった情報について、今後マッピングやモニタリングが必要になる可能性がある。

圃場群Dは畑地であると思われるが、3月12日、4月10日に確認できなかった施設が、7月16日のSPOT-5画像では確認できる。農業施設と考えられるが、原発事故当時、地表面は曝露されていたと言える。

さらにここでは、圃場以外の部分、森林にも注目してみる。森林域の抽出の項でも触れたが、図21のGeoEye-1画像では林相を判読することが可能である。ABC圃場群の西側は樹冠が確認できることから針葉樹であることがわかる。一方、東側は樹冠がそれほど多く確認できず、4月10日では緑葉の展開前のように見えることから広葉樹が主体であることがわかる。また、北東部には針葉樹があり、東南部には四角に伐採された跡が認められる。ALOS画像では、林班は確認できるものの、ABC圃場群の東西での違いはほとんど確認できない。SPOT-5画像は季節が夏であり、針葉樹も広葉樹も葉があるため、いずれも近赤外が強く(赤く)なっている。しかし、GeoEye-1画像と見比べてみると、針葉樹と広葉



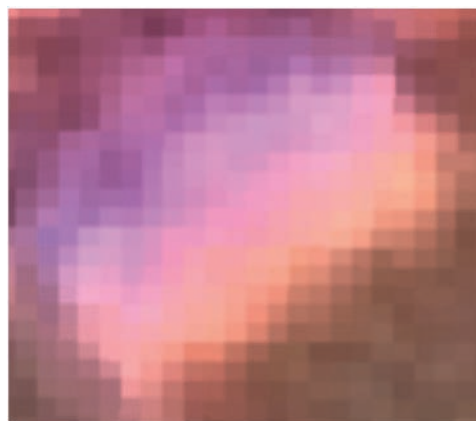
©GeoEye distribution JSI

GeoEye-1  
2011年4月10日  
(R:G:B=赤:緑:青)



©JAXA distribution RESTEC

ALOS/AVNIR-2+PRISM  
2011年3月12日  
(R:G:B=赤:緑:青)

includes material ©CNES (2011), Distribution  
Spot Image S.A., France, all rights reserved

SPOT-5  
2011年7月16日  
(R:G:B=近赤外:赤:緑)

50m

図18 圃場Gの衛星画像（パンシャープン済み）

樹の違いがあると思われる部分で色が若干違っている。ただし、森林の場合、樹種の違いのみでなく、斜面方位の違いなども色調の違いに影響するため1対1で対応するわけではない。また、草が繁茂するため、作業跡の林班との差が小さくなっていることも判読できる。今後、水やリターを介した森林から農地への放射性セシウムの移入について明らかになった場合、谷の東側の圃場と西側の圃場では影響の受け方が変わる可能性があることから、このようなデータを取得・整備しておくことも重要である。

#### 4 玄米中の放射性セシウム濃度と衛星画像との関係解析

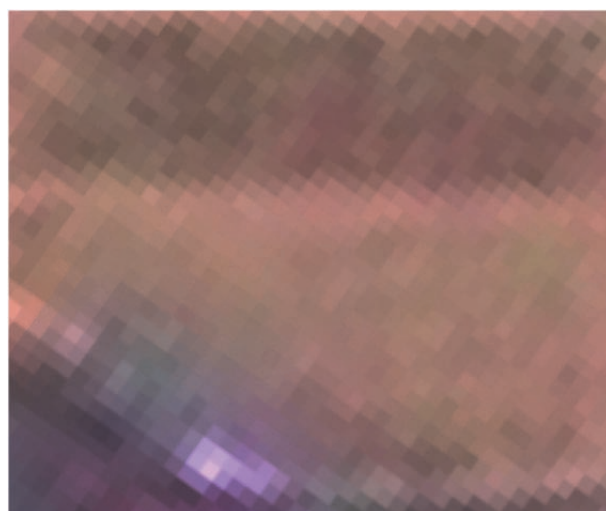
玄米への放射性セシウムの移行メカニズムは当初考えられていたものよりかなり複雑であり、現時点ではまだ明らかになっていない。当初想定されていた隣接する森林からの移入なども、玄米への移行が高まる要因の一つとして考えられるが、これだけで今回の事象を説明できないことも明らかになってきている。現在検討が進められている要因としては、土壌中のカリウム含量、根張りおよび作土深など衛星データから直接読み取れない要因へ移ってきている。玄米中の放射性セシウム濃度の最高値と、圃場のGeoEye-1衛星データ観測値について近赤外波長や植生指数などとの比較を行ったが、明確な関係





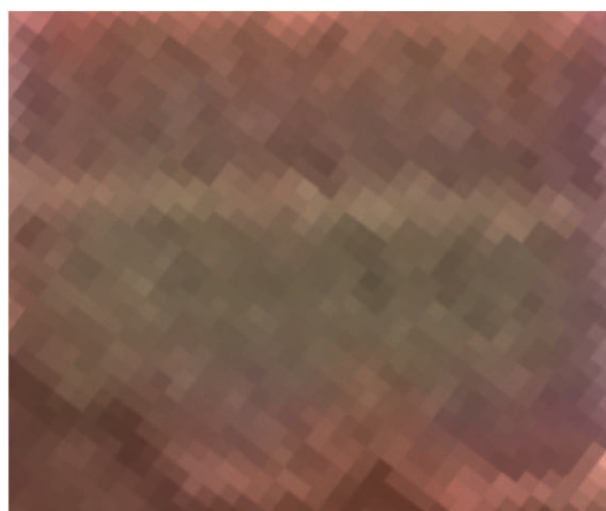
©GeoEye distribution JSI

GeoEye-1  
2011 年 4 月 10 日  
(R : G : B = 赤 : 緑 : 青)



©JAXA distribution RESTEC

ALOS/AVNIR-2+PRISM  
2011 年 3 月 12 日  
(R : G : B = 赤 : 緑 : 青)



includes material ©CNES (2011), Distribution  
Spot Image S.A., France, all rights reserved

SPOT-5  
2011 年 7 月 16 日  
(R : G : B = 近赤外 : 赤 : 緑)

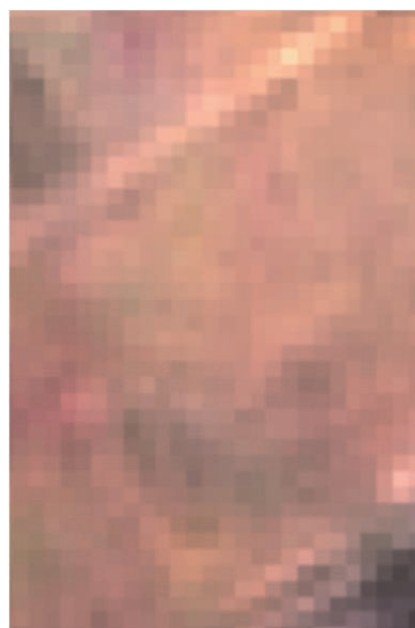
50m

図19 圃場H、圃場Iの衛星画像（パンシャープ済み）



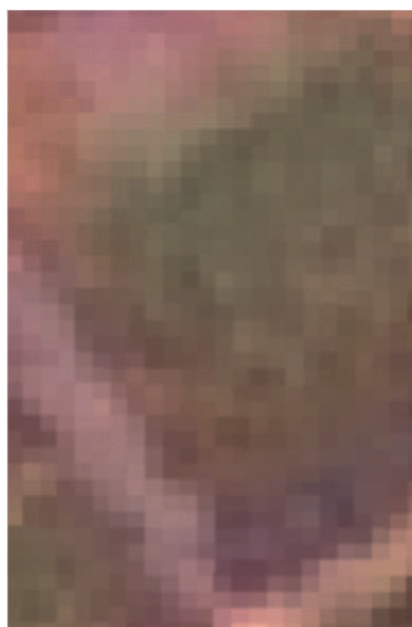
©GeoEye distribution JSI

GeoEye-1  
2011年4月10日  
(R : G : B=赤 : 緑 : 青)



©JAXA distribution RESTEC

ALOS/AVNIR-2+PRISM  
2011年3月12日  
(R : G : B=赤 : 緑 : 青)

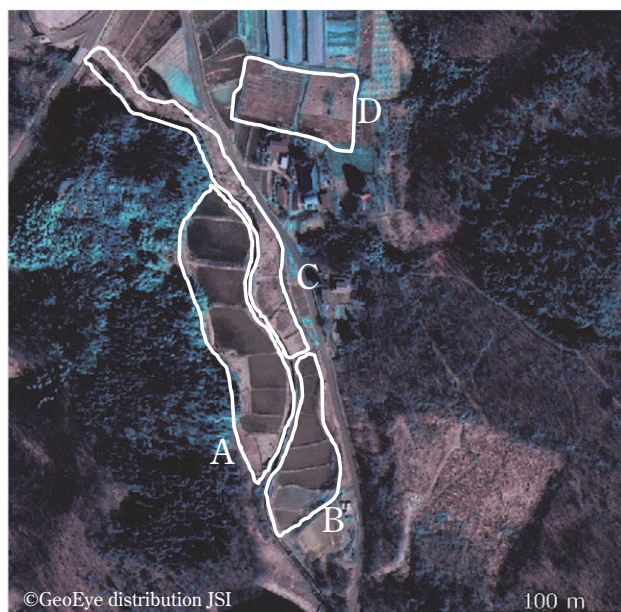


50m

includes material ©CNES (2011). Distribution  
Spot Image S.A., France, all rights reserved

SPOT-5  
2011年7月16日  
(R : G : B=近赤外 : 赤 : 緑)

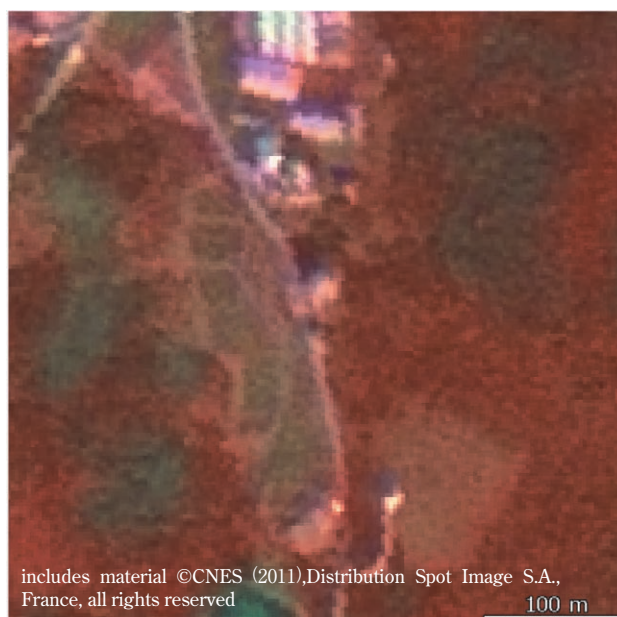
図20 圃場J、圃場Kの衛星画像（パンシャープン済み）



GeoEye-1  
2011 年 4 月 10 日  
(R : G : B=赤 : 緑 : 青)



ALOS/AVNIR-2+PRISM  
2011 年 3 月 12 日  
(R : G : B=赤 : 緑 : 青)



SPOT-5  
2011 年 7 月 16 日  
(R : G : B=近赤外 : 赤 : 緑)

図21 地域 (3) の衛星画像 (パンシャープン済み)



が見られたものはほとんど無かった。例として、近赤外波長のDN (Digital Number) と玄米中の放射性セシウム濃度の最高値との散布図を図22に示す。

様々な波長について関係性を検討した結果、統計的に有意な数値は得られなかったものの、現在考えられている要因を説明する結果が一つだけ見られた。図23は、土地被覆分類の結果、稲藁が集められたりした形跡が見られなかった裸地および収穫後不耕起のままの水田とされた圃場について、赤の波長のDNと玄米中の放射性セシウム濃度の最高値をプロットした図である。この図において、暫定規制値を超える玄米が収穫されたような圃場は、2011年4月10日に撮影されたGeoEye-1画像において赤の波長の反射が低くなっていた。圃場の土壤自体の反射に差がないとした場合、反射が小さいほど水分が多いことになるため、暫定規制値超えの玄米が収穫されたような圃場は水分が多かったことになる。アメダスデータによると、前日の2011年4月9日に福島市で5.5 mm、飯舘で7.5 mmの降水を観測している。この降水によって圃場がどの程度水分を含んだかが、赤の波長の反射の差となって見えていると考えられる。これは圃場内のムラとして見られる場合もあり、その一例は図16の圃場Eにおいて見られる。ただし、実際には降雨は均一でなく、土壤の違いも存在しているはずであり、この現象は水分の違いのみではなく、土壤の違いも加味されていると考えられる。土壤の有機物が多い場合、黒ボク土にみられるように暗い色になり、酸化鉄が多ければ赤が強くなる。したがって、水分条件が一定と仮定するならば、暫定規制値を超えたような水田の土壤は、衛星から見て赤の波長の反射の小さい土壤ということになる。このことは、先に示した図22において近赤外波長との間に明らかな関係が見られなかったことも、水分のみの影響でないことを裏付けている。したがって、実際にはこれらの

要因が複合的に作用していると考えられ、水分条件または土壤のいずれかの条件を整えなければ統計的に有意な相関までは見られないと思われる。要因を分離するだけのデータがないためこれ以上の解析はできないが、圃場における観測時の水分状態や土壤特性の違い、耕起具合など様々な要因によって圃場間の差が発生し、赤の波長において最も差が現れたのではないかと考えられる。

## 5 広域の湛水圃場把握

図24Bに示したのは、福島県の須賀川市、天栄村付近の分類結果の拡大図である。赤色が主に水稻の作付けによって湛水した圃場、黄色が畑地・樹園地・草地そして生産調整によって湛水されなかった圃場を示す。AのSAR画像と比較すると、SAR画像の暗い部分が赤い部分にはほぼ対応しており、精度良く湛水地と非湛水地を判別できている。また、中央部には黄色い非湛水地の塊（破線部分）が確認できるが、圃場耕区ポリゴンが存在していることから何らかの農地である一方、湛水はしていない農地と判別できている。広域で把握した湛水圃場全体を図25に示した。ここでは見やすさを考慮し湛水圃場のみを赤で示した。

茨城、栃木や群馬で行った現地調査のデータおよび土壤サンプリング時に記録された福島県の作付情報を用いて精度検証を行ったところ、サンプル数2,597圃場でSARデータにより正しく湛水および非湛水と分類された割合のOverall accuracy (総合分類精度) は77.0%、SARにより正しく湛水地と分類されたサンプルと実際の湛水地サンプルの割合であるProducer's accuracy (作成者精度) のみを見ると89.6%という数字が得られた。県別にみると、福島県の精度が最も低く、Overall accuracyは68.1%となった。福島県の精度が最も低くなったのは、福島第一原発事故の影響により、各農家が当該年度に作付けを

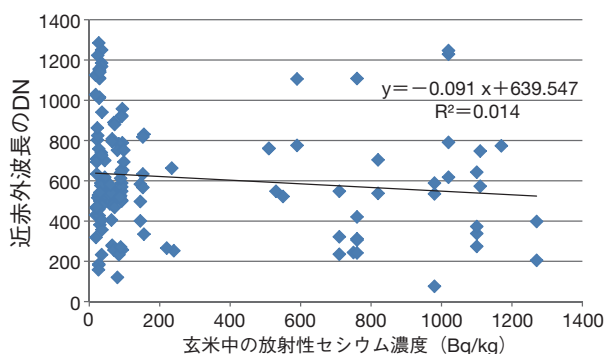


図22 GeoEye-1画像の近赤外波長のDNと玄米中の放射性セシウム濃度の最高値

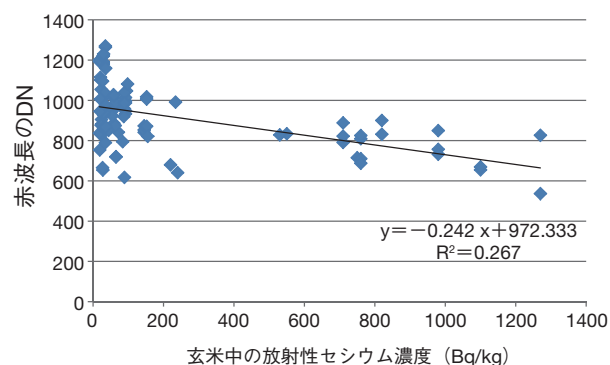
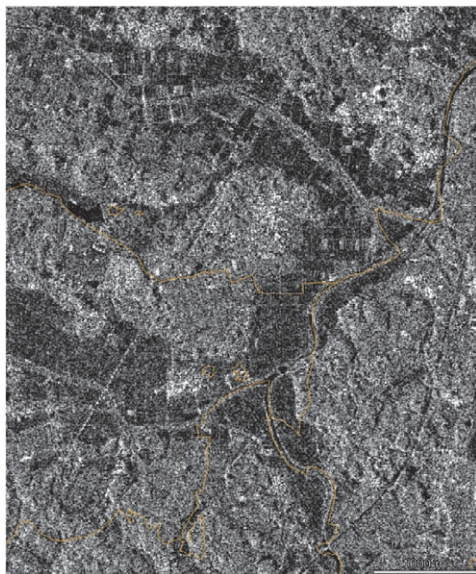
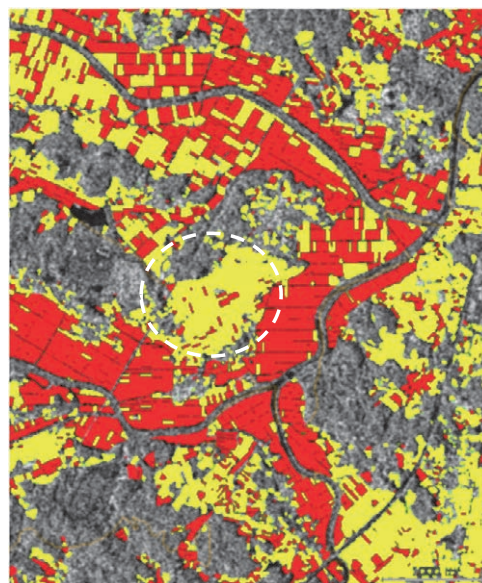


図23 GeoEye-1画像の赤波長のDNと玄米中の放射性セシウム濃度の最高値



RADARSAT-2 Data and Products (c)MacDONALD,  
DETTWILER AND ASSOCIATES LTD.  
2011- All Rights Reserved

A) RADARSAT-2 画像  
(2011年6月19日観測)

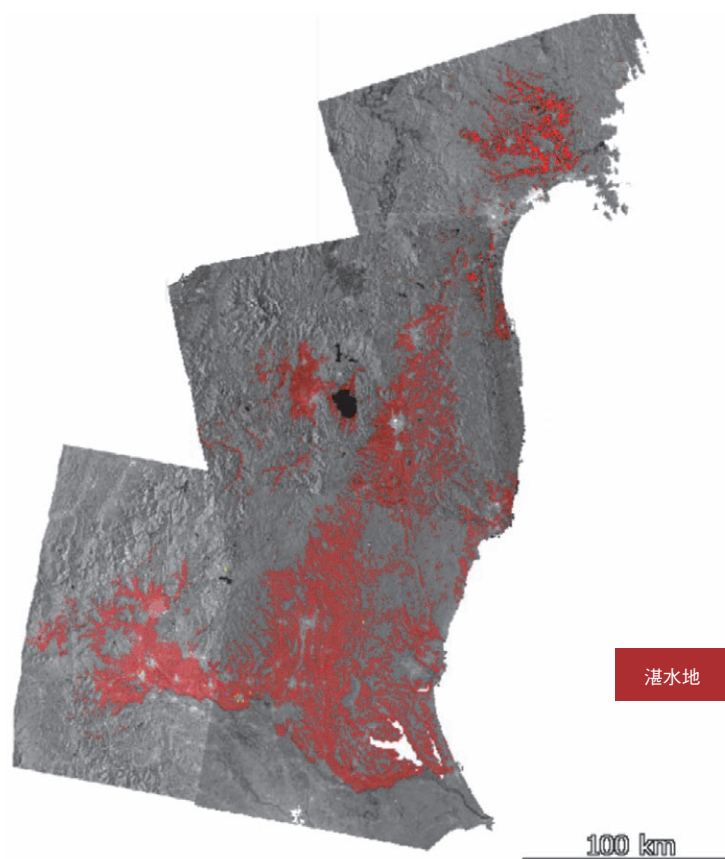


湛水地

非湛水地

B) 湛水地・非湛水地の分類結果

図24 福島県須賀川市、天栄村付近における湛水地・非湛水地の分類結果例



湛水地

100 km

RADARSAT-2 Data and Products (c) MacDONALD, DETTWILER AND ASSOCIATES LTD.  
2011- All Rights Reserved

図25 広域の湛水地検出結果



してよいかどうかの判断に迷い、例年どおりに作業を行う農家と、育苗～移植までの作業が遅くなる農家があり、作付時期が大きく分散したためと考えられる。全体的には、2011年度は東日本震災・福島第一原発事故の影響などがあったことも加味して判断すると、満足できる高い制度であると言える。

#### Ⅳ むすび

本研究では、衛星リモートセンシング技術を用い、2011年3月11日の東日本大震災にともない発生した福島第一原発の事故による農地の放射性物質汚染の評価に資するため、2011年の福島県および隣接県における農地の環境状態の把握を試みた。

まず、光学高分解能衛星画像を用いることで、事故後約1ヶ月を経た農地の地表面状態を判読した。解像度が50cmと高い衛星画像を用いたため、耕起の状態や稲藁の存在、水分ムラなどを判読できた。また、事故直後に撮影されたALOS画像や夏季に取得されたSPOT-5衛星画像を組み合わせることで、耕起や稲藁の処理のタイミングなどを推定した。合わせてDEMを用いたGIS解析を組み合わせ、圃場の周囲の森林域からの距離や、傾斜度などの条件が重なる圃場の抽出などを行った。

さらに、(独) 農業環境技術研究所で取り組まれた、広域の放射性物質による土壌汚染評価に用いるため、2011年度の湛水圃場を衛星画像から検出し、分布状態を把握した。ここでは、天候に左右されずに確実に観測可能なSARを用いて湛水期に観測を行うことで、福島、茨城、栃木、群馬、宮城という広域の約320万筆以上の農地に対し湛水判別を行い、湛水地分布図を作成した。茨城、栃木、群馬で行った現地調査のデータおよび土壌サンプリング時に記録された福島県の作付情報を用いて精度検証を行ったところ、サンプル数2,597圃場で総合分類精度は77.0%、湛水地のProducer's accuracyのみを見ると89.6%という数字が得られた。全体的には、2011年度は東日本震災・福島第一原発事故の影響などがあったことも加味して判断すると十分に良い制度であると考えられる。この結果は、農地土壌における放射性物質濃度分布図の作成にインプットデータの1つとして利用された。

#### 謝 辞

農林水産省大臣官房統計部が「水稻作付面積調査における衛星画像活用事業」で開発した「水稻作付地判別・面積求積システム」によって、膨大な量の作業を効率良く処理することができた。また、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、千葉県の各土地改良事業団体連合会には、水土里情報の提供を受けた。ここに謝意を表す。

#### 引用・参考文献

- 1) 石塚直樹 (2006)：水稻作付面積計測への合成開口レーダ (SAR) の利用. 農業環境技術研究所報告, 24, 95-151
- 2) Hartigan, J. A. and Wong, M. A. (1979). "Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm". Journal of the Royal Statistical Society, Series C 28 (1). pp.100-108
- 3) JAXA (2009)：リサンプリング法に依存するバンド間の位置ずれについて、センサの特性等に起因する事象について、[http://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/satellite/data\\_tekyo\\_setsumei/alos\\_tyui/gazourenraku\\_13\\_j.html](http://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/satellite/data_tekyo_setsumei/alos_tyui/gazourenraku_13_j.html) (accessed 2013-10-10)
- 4) 農林水産省 (2012)：「農地土壌の放射性物質濃度分布図」の作成について、平成24年3月23日報道発表, <http://www.saffrc.go.jp/docs/press/120323.htm> (accessed 2013-10-10)
- 5) 農林水産省 (2010)：「水稻作付面積調査における衛星活用事業実績業務報告書」
- 6) 高田裕介 (2011)：農地土壌の放射性物質濃度分布の把握. 農業環境技術研究所 平成23年度 研究成果情報, [http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result28/result28\\_02.html](http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result28/result28_02.html) (accessed 2013-10-10)

#### 摘 要

本研究では、衛星リモートセンシング技術を用い、2011年3月11日の東日本大震災にともない発生した福島第一原発の事故による農地の放射性物質汚染の評価に資するため、2011年の福島県および隣接県における農地の環境状態の把握を試みた。光学高分解能衛星画像を用いることで、事故後約1ヶ月を経た農地の地表面状態を判読した。

また、2011年度産の湛水圃場を衛星画像から検出し、分布状態を把握した。ここでは、天候に左右されずに確



実に観測可能なSARを用いて湛水期に観測を行うことで、福島、茨城、栃木、群馬、宮城という広域の約320万筆以上の農地に対し湛水判別を行い、湛水分布図を作成した。この結果は、農地土壌における放射性物質濃度分布図を作成する上で利用された。